

Michal KROPÁČEK¹, Jiří ŠAFRATA²

OBJEMOVÉ ZMĚNY CEMENTŮ Z RŮZNÝCH LOKALIT V ZÁVISLOSTI NA ČASE

**VOLUME CHANGES OF CEMENTS FROM DIFFERENT LOCATIONS
DEPENDING ON TIME**

Abstrakt

Článek se zabývá objemovými změnami cementu CEM I 42,5 R, který byl po dobu několika měsíců odebírán ze všech cementáren na území České republiky. Měření se provádělo ve smršťovacím žlabu, který umožňuje zaznamenávat objemové změny v raných fázích tuhnutí směsi. Cílem práce bylo posoudit chování jednotlivých cementů v delším časovém úseku z hlediska objemových změn a porovnat je mezi sebou.

Klíčová slova

Cement, Objemové změny, Chemické smrštění, Smrštění vysycháním, Smršťovací žlab.

Abstract

This article is dealing with volume changes of cement CEM I 42,5 R, which was for several months taken from all of cement works in Czech Republic. Measurement was performed by shrinkage drain, which allows register volume changes in early age of curing of mixture. Purpose of this work was gauge behavior of each cement in longer period of time in terms of volume changes and compare these cements between themselves.

Keywords

Cement, Volume changes, Chemical shrinkage, Drying shrinkage, Shrinkage drain.

1 ÚVOD

Objemové změny cementů, cementových kompozitů a samozřejmě betonů na bázi cementového pojiva působí ve stavebnictví i v současnosti poměrně výrazné problémy. Objemové změny z největší míry způsobuje cement a jeho podíl v kompozitu. Během hydratace prochází výraznými chemickými procesy, kdy vznikají nové fáze a tento proces vyžaduje obezřetné chování při volbě složek, celkovém složení kompozitu a následném ošetřování. Pro objemové změny má kromě zvoleného cementu zásadní význam vodní součinitel a poměr pojiva a kameniva. Konečné složení kompozitu tak bývá klíčovým faktorem v následném chování v konstrukci. [3]

Trhliny způsobené objemovými změnami mohou dosahovat rozměrů, které překračují normové požadavky v závislosti na konkrétní konstrukci. Takto narušená struktura kompozitu je významný problém například u vodotěsných konstrukcí, které musí mít minimální průnik tlakové vody. Kromě toho také narušená struktura dovoluje pronikání škodlivých látek, které urychlují karbonataci, depasivaci výztuže a její následnou korozi. Pokud se tedy špatným složením,

¹ Ing. Michal Kropáček, Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 925, e-mail: michal.kropacek.st@vsb.cz.

² Ing. Jiří Šafrata, Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 958, e-mail: jiri.safrata@vsb.cz.

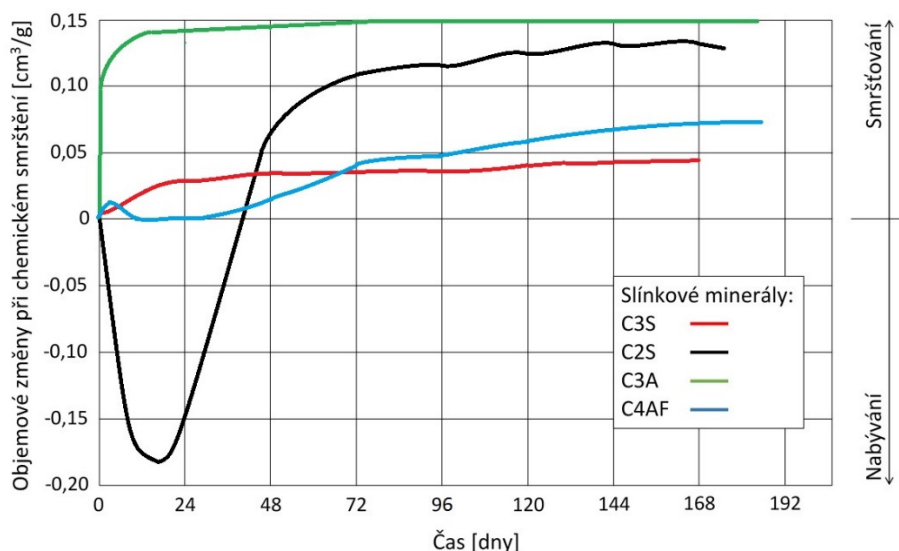
nedostatečným ošetřování nebo dokonce zcela chybně zvoleným ošetřováním docílí negativních změn, je to v přímém rozporu se současnou tendencí moderního stavitelství, která se snaží neustále zdokonalovat vlastnosti a přicházet s novými technologiemi nejen u betonu.

2 PROBLEMATIKA OBJEMOVÝCH ZMĚN

Z hlediska objemových změn je nutné se zaměřit na smrštění. Existuje několik typů smrštění, z nichž každé má specifické chování v kompozitu. Konkrétně se jedná o plastické smrštění, smrštění vysycháním, autogenní smrštění, chemické smrštění (autor si dovoluje oddělit chemické a autogenní smrštění, přestože je v literatuře občas spojováno do jednoho pojmu), teplotní smrštění a karbonatační smrštění [2]. Z podstaty této práce se lze vymežit na chemické smrštění a smrštění vysycháním. Případně také teplotní smrštění. Jelikož měla malta dle příslušného standardu [5] vodní součinitel 0,5 a byla uložena ve vlhkém prostředí 95 % lze zanedbat plastické smrštění. Autogenní smrštění nabývá na významu u kompozitu s vodním součinitelem nižším než 0,46, ačkoliv k němu dochází i u kompozitu s vyšším vodním součinitelem jeho význam je tak nízký, že lze také zanedbat. [3]

Chemické smrštění je nedílnou součástí hydratačních procesů. Během hydratace vznikají hydratační produkty, které mají nižší součet absolutních objemů (o 8 až 10 %) a uvnitř cementové pasty se objevují póry. V praxi pak nastávají dvě situace. Pokud probíhá hydratace na vzduchu, cementová pasta se smršťuje, ve vodě je ale tento trend opačný a dochází k nabývání. S dostatkem vody je tedy chemické smrštění neškodné. [2]

Během hydratace ale nedochází pouze ke smrštění. Slínek, jakožto dominantní podíl portlandského cementu (95 – 100 %), obsahuje slínkové minerály, jejichž chování je během hydratace velmi odlišné. Na obrázku číslo 1 lze vidět, že C_2S vykazuje oproti zbylým slínkovým minerálům významné nabývání. Naproti tomu C_3A , který velice rychle reaguje v řádu minut a hodin vykazuje výrazné smrštění. [6] Z obrázku je tak možné vyvozovat různé vysoké smrštění v závislosti na obsahu C_3A , které se u odebíraných cementů v závislosti na konkrétní cementárně poměrně výrazně liší [7].



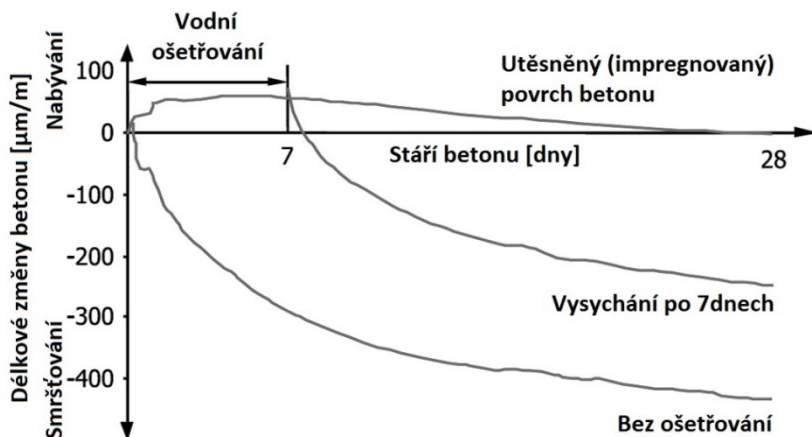
Obr. 1: Vliv slínkových minerálů na chemické smrštění [6]

V této souvislosti se lze opřít o dvě kritické hodnoty cementové pasty. Tou první je vodní součinitel 0,22, při kterém dochází k tvorbě hydratačních produktů. K dosažení úplné hydratace je však nutné mít v uzavřeném systému, tedy bez přísunu vnějšího zdroje vody, vodní součinitel alespoň

0,42. Tento fakt je způsoben vázáním části vody na nové vzniklé hydratační produkty (C-S-H gel) [2]. S přihlédnutím k článku lze použitou maltu považovat jako vyhovující.

Druhým významným jevem v této práci je smrštění vysycháním, kterému byly vzorky vystaveny po 7 dnech od míchání. Pokud se kompozit dostane do prostředí s relativní vlhkostí vzduchu nižší než 95 % a není chráněn před vysycháním, dochází k odpařování vody. To vede k tvorbě menisků v kapilárním systému a generuje se tahové napětí, které způsobuje smrštění. Collepardi [3] uvádí, že lze zanedbat toto smrštění, pokud je kompozit s vodním součinitelem alespoň 0,46 uložen v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu vyšší než 94 %. V prvním týdnu byly z tohoto pohledu pro tuto práci opět vyhovující podmínky.

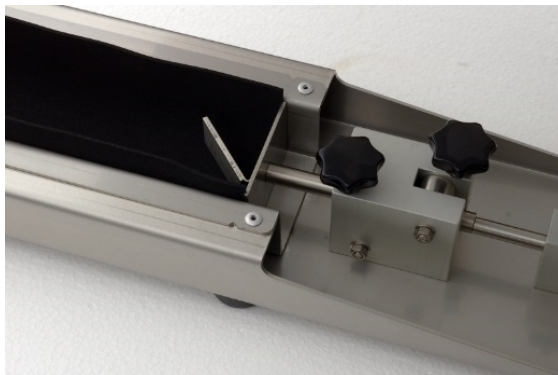
Experimentálně bylo zjištěno, že jakýkoliv beton se během ošetřování vodou nesmršťuje, naopak má tendenci nabývat. Na obrázku číslo 2 je zobrazeno chování betonu v závislosti na konkrétním prostředí. Āitcin dodává, že většina cementu je na povrchu betonu po 7 dnech již zhydratovaná a další ošetřování má tak malý význam na vývoj smrštění [1].



Obr. 2: Délkové změny betonu s $w/c = 0,35$ v závislosti na různých režimech ošetřování [1]

Objemové změny cementu respektive kompozitu jsou velmi rozsáhlé téma, které je ovlivněno mnoha vnějšími vlivy. Je nutné si také uvědomit, že objemové změny budou vždy nedílnou součástí hydratace cementu, do jisté míry vychází z jeho složení. Díky vývoji a pokroku ve výrobě lze určitým způsobem zabránit vzniku trhlin jako důsledku nedostatečného ošetřování nebo přímo nevhodného složení, ale objemové změny samy o sobě nikdy odstranit nepůjdou a je třeba k nim správným způsobem přistupovat. Dosud standardizované postupy nezachycují měření objemových změn bez mechanického zatížení cementu nebo cementového kompozitu od počátečního stádia až po dosažení kvazistabilního stavu. Výrobci cementu sice stanovují objemovou stálost, ale ta se zabývá spíše případnými nestandardními výkyvy ve složení a je tak poměrně stranou od této problematiky. Pro beton existuje norma ČSN 73 1320 + Z1 [4], která popisuje měření objemových změn na ztvrdlých trámcích, což je značně nedostatečné. Měření je možné zahájit až ve chvíli, kdy vzorky dosáhnou minimálních manipulačních pevností a obvykle tak chybí časový úsek 24 hodin, během kterého proběhlo mnoho změn. K objemovým změnám dochází záhy po uložení a je tak velmi výhodné mít možnost přesně a spolehlivě měřit i tato stádia ve stabilních teplotních a vlhkostních podmínkách.

Při testech se měření objemových změn malt provádělo pomocí zkušebních žlabů německé firmy Schleibinger, které mají posuvné čelo zachycující délkové změny, viz obrázek 3, kde je detail na pohyblivou část žlabu. S těmi již dříve pracovala fakulta stavební VUT v Brně a v rámci výzkumného záměru vypracovali ucelený operační postup [8], ze kterého bylo možné vycházet. Po několika dnech měření v korýtkách se dále k měření využíval příložený deformetr.



Obr. 3: Měření objemových změn ve smršťovacím žlabu

3 MĚŘENÍ OBJEMOVÝCH ZMĚN

Pro zkoušení byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R, který byl odebrán ze všech cementáren na území České republiky od měsíce listopad 2013 po červen 2014.

Výrobci cementů jsou uvedeni v následujícím výčtu:

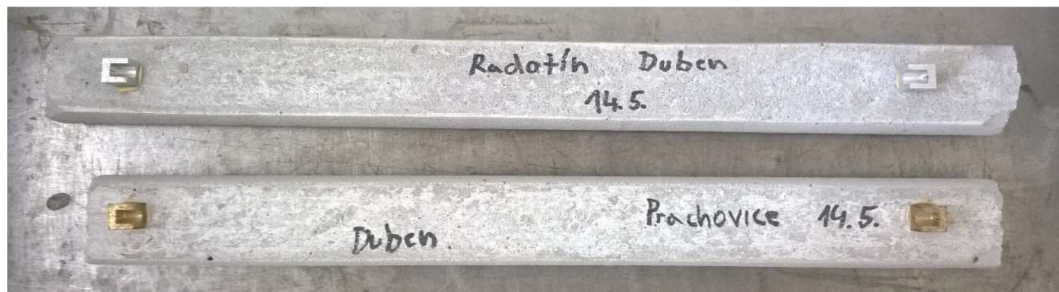
- LaFarge Cement Čížkovice, a.s.
- Buzzi Unicem Cement Hranice, a.s.
- HeidelbergCement Českomoravský cement Mokrý, a.s.
- Cemex Prachovice, a.s.
- HeidelbergCement Českomoravský cement Radotín, a.s.

Ke zkouškám se používala malta, jejíž složení bylo v souladu s normou ČSN EN 196-1 [5]. Jednotlivé složky byly uloženy v laboratoři minimálně 3 dny, než bylo zahájeno míchání. Tím byla zaručena stálá teplota vzorků i křemičitého písku na úrovni teploty v laboratoři. Teplota vody z vodovodního řádu byla 22 ± 2 °C. Malta se míchala v laboratoři BETOTECH, s.r.o. v Ostravě a při míchání se vycházelo ze stejné normy [5]. Z důvodu většího množství malty, byla použita mobilní míchačka Smartest, což mělo za následek drobné odchýlení od normou přesně daného postupu míchání. Laboratorní podmínky během výroby vzorků byly standardní s teplotou 22 ± 2 °C a relativní vlhkostí vzduchu 40 – 55 %. Teplota malty před uložením byla 22 ± 1 °C. Jak již bylo uvedeno výše, měření se provádělo nejprve automaticky pomocí smršťovacích žlabů Schleibinger, ty umožňují zhotovit zkušební tělesa o velikosti 60 x 40 x 1000 mm, viz obrázek 4. Měření bylo zahájeno po 15 minutách od uložení malty do žlabu, je to z toho důvodu, aby malta lehce zatuhla a bylo možné vyměnit opěru posuvného čela za čidlo posuvu. Teplota i vlhkost prostředí se sledovala čidlem, společnou ústřednou, tyto hodnoty byly automaticky snímány každých 15 minut. Žlaby byly uloženy 7 dní ve vlhkém prostředí, které zajistila komora s relativní vlhkostí vzduchu ≥ 95 % a teplotou 20 ± 2 °C.

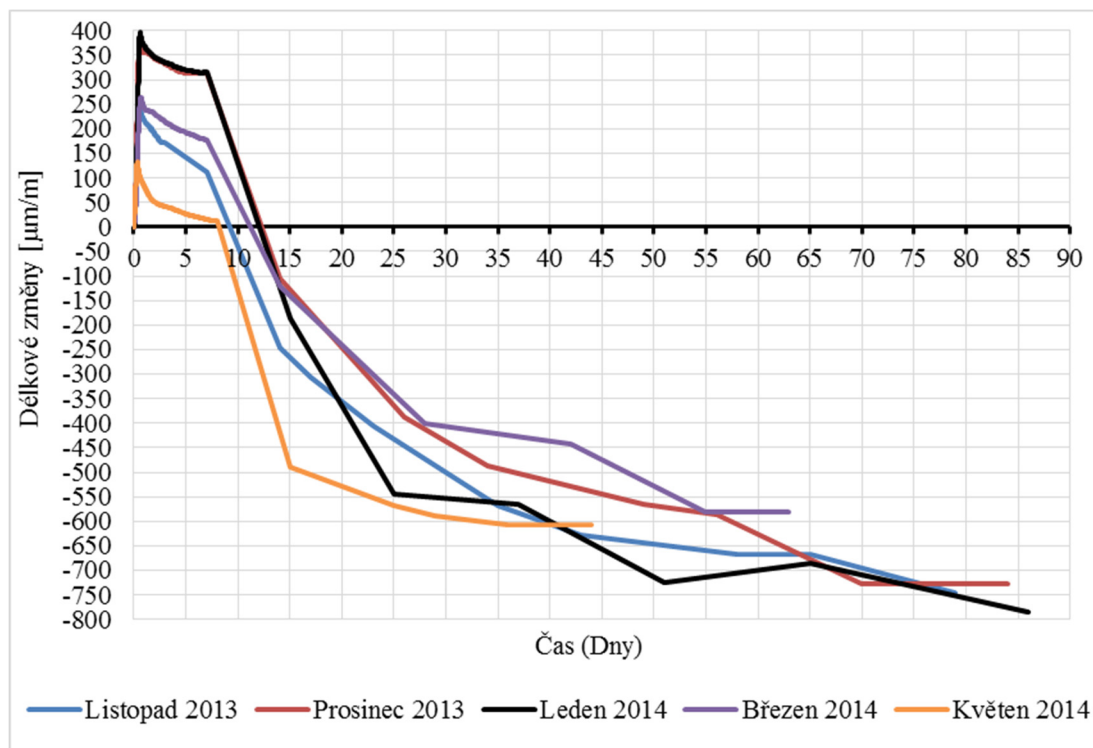


Obr. 4: Měření objemových změn ve smršťovacím žlabu

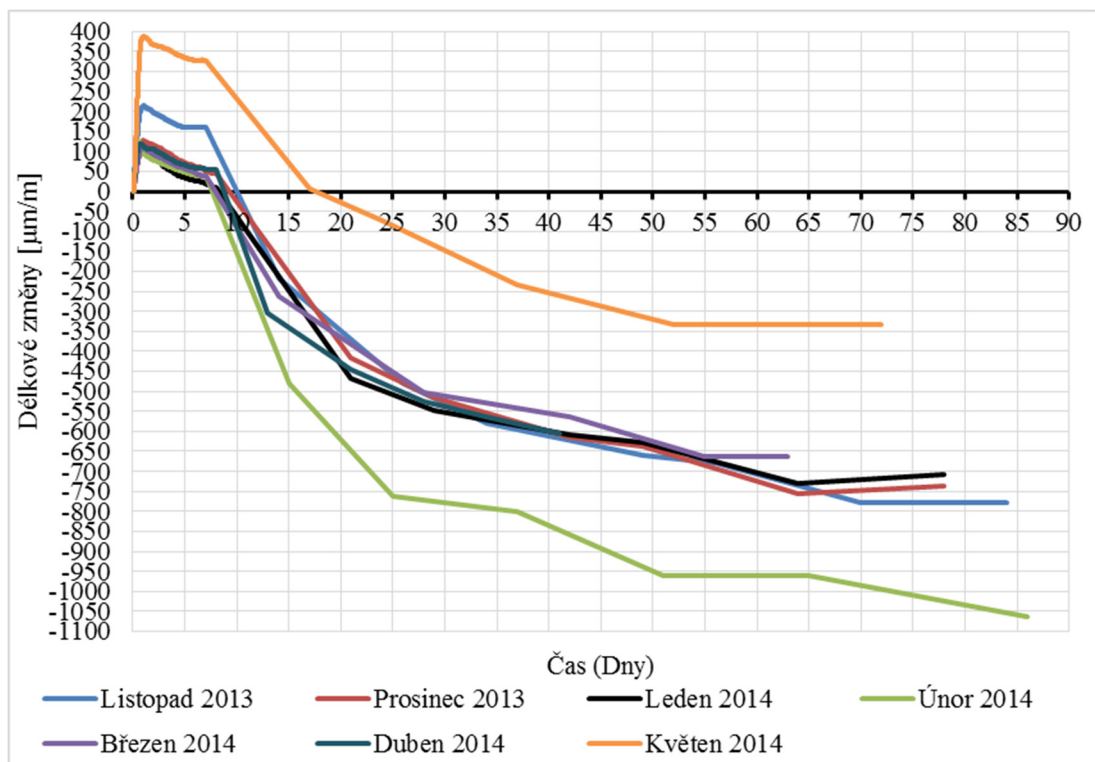
Po 7 dnech byly ztvrdlé vzorky vytaženy z vlhkého prostředí a pomocí nalepených terčíků se objemové změny měřily deformetrem. Příložený deformetr se před každým měřením nakalibroval pomocí etalonu. Měření probíhalo až do doby, než měly 2 naměřené hodnoty po sobě obdobné výsledky. Není možné naměřit shodné výsledky, v čase bude neustále docházet k minoritním objemovým změnám. Intervaly měření se pohybovaly v řádu dní s tím, že četnost měření se prodlužovala v souvislosti se stářím vzorků. V konečné fázi se jednalo obvykle o intervaly 14 dní.



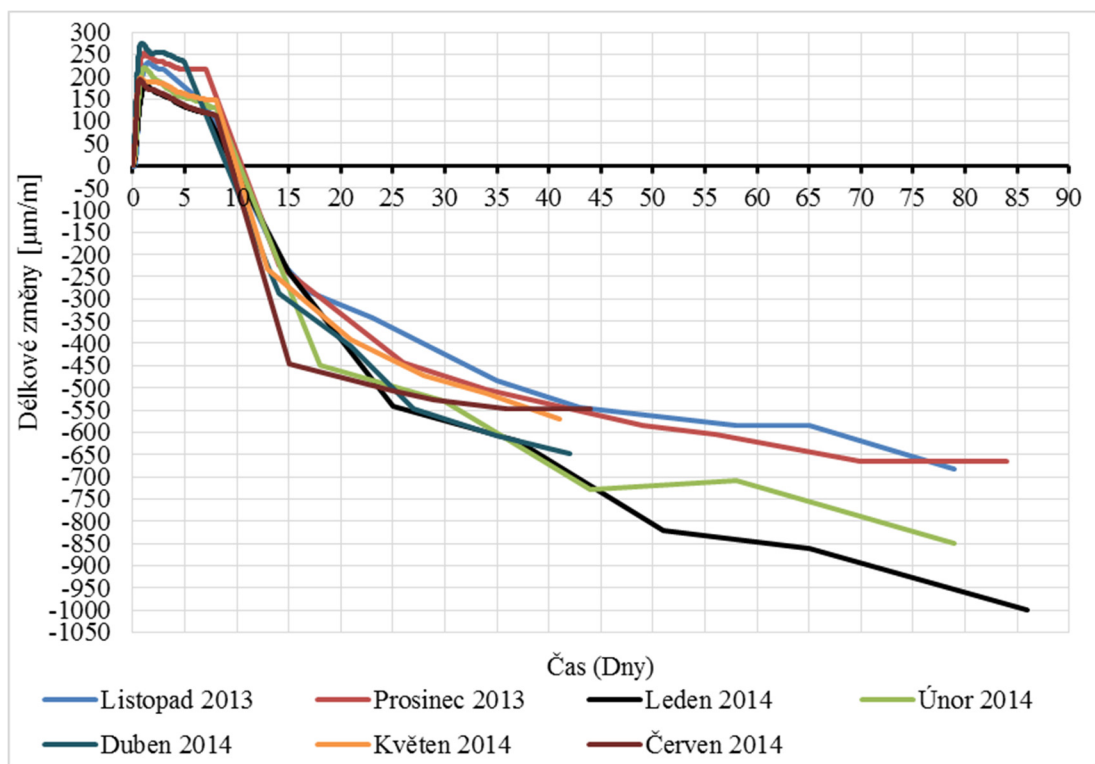
Obr. 5: Zkušební tělesa s přilepenými terčíky



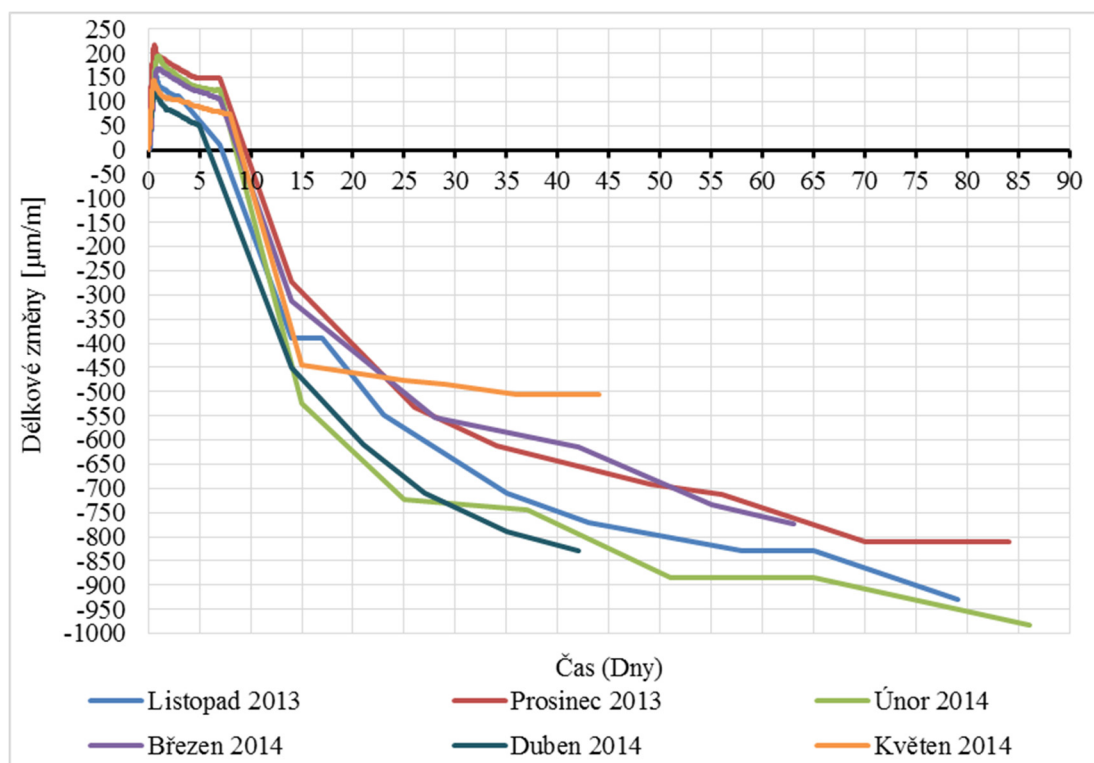
Obr. 6: Délkové změny těles – cement Čížkovice



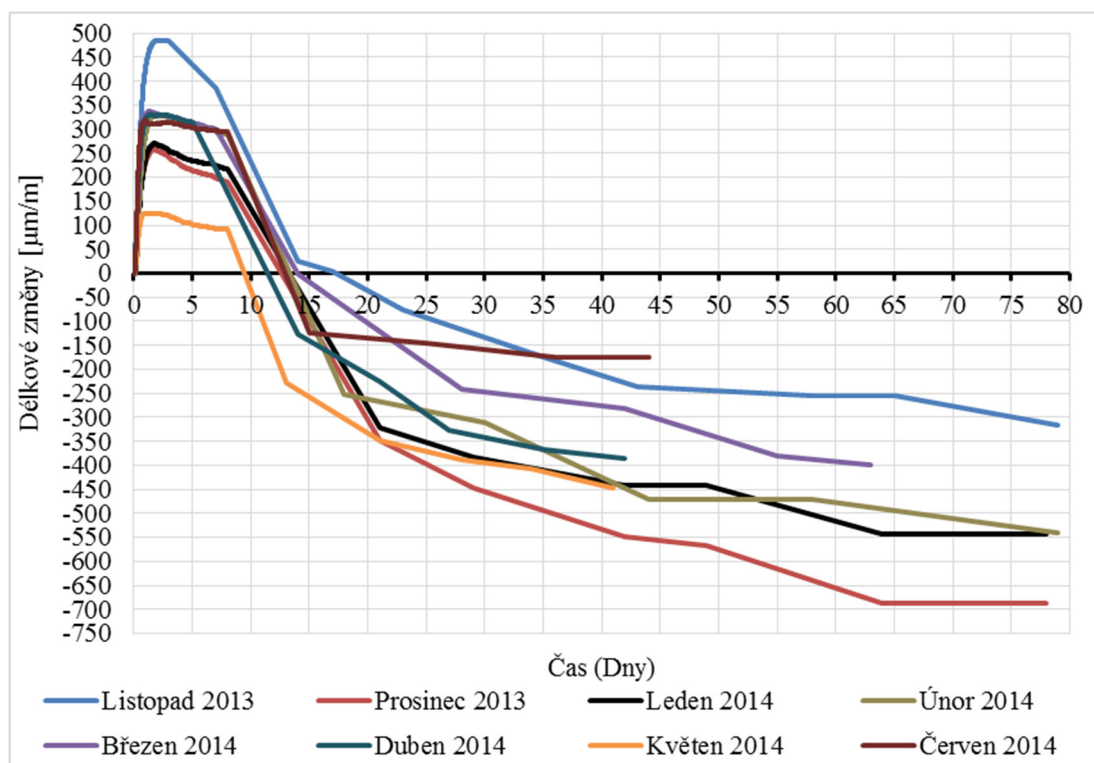
Obr. 7: Délkové změny těles – cement Hranice



Obr. 8: Délkové změny těles – cement Mokrá



Obr. 9: Délkové změny těles – cement Prachovice



Obr. 10: Délkové změny těles – cement Radotín

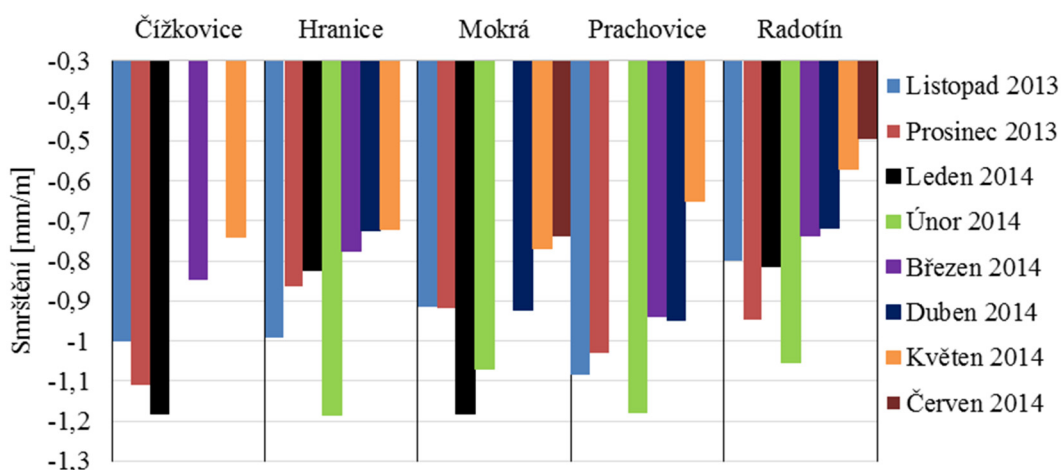
Ke grafům je důležité zmínit, že se jedná o souhrnný výsledek jednoho konkrétního cementu a nebylo možné přehledně přiřadit ke každému vzorku příslušnou vlhkost a teplotu. Nicméně byla snaha udržet v laboratorním prostředí co možná nejstálější podmínky. Přesné hodnoty lze najít v autorově diplomové práci [7].

4 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z hlediska vyhodnocení si každý cement zaslouží samostatný rozbor, ale obecně lze říci, že u každého cementu dochází v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí k nabývání. To může být způsobeno několika jevy. Největším dílem se na nabývání budou podílet chemické reakce. K nabývání dochází z důvodu vzniku hydratačních produktů. Částečně se na nabývání mohou podílet minerály vykazující rychlý růst. Tento jev je spojen s ettringitem, nicméně podobné chování vykazuje také portlandit. Růst ettringitu probíhá v řádu několika minut až hodin. Vznik hydratačních produktů je spojen s vázáním vody, což je příklad C-S-H gelu a takové produkty pak generují nabývání. Nelze však opomenout také vliv teploty. V době nejvyšších hodnot nabývání také vrcholí křivka hydratačního tepla. To se může projevit v počátečním nabývání a v případě vysokého teplotního gradientu může docházet posléze ke smrštění. U drtivé většiny malt dochází k nabývání v prvních hodinách. Počátek smrštění se již výrazně liší. K nabývání docházelo v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu přes 90 % a lze se tak domnívat, že pokud by byly vzorky uloženy ve vodě, bylo by nabývání ještě vyšší. Toto smrštění ale ve vlhkém prostředí neklesne do záporných hodnot (redukuje se nabývání), čímž nedochází ke vzniku smršťovacích trhlin a potvrzuje se tak nutnost precizního ošetřování v raných stádiích. Po 7 dnech byly vzorky vytaženy z vlhkého prostředí a byly ponechány v laboratorních podmínkách s teplotou 22 ± 2 °C a relativní vlhkostí vzduchu 50 ± 10 %. K chemickému smrštění se tak přidává smrštění vysycháním. Chemické smrštění probíhá až do úplné hydratace cementu, což je dlouhodobý proces, který závisí mimo jiné na jemnosti mletí. Smrštění vysycháním nastane vždy při přechodu z vlhkého prostředí do prostředí s relativní vlhkostí vzduchu nižší než 94 %, cílem je ale tento přechod oddálit do doby, kdy má kompozit takovou pevnost, že bude tímto smrštěním ovlivněn minimálně.

Z grafů a následného vyhodnocení lze zhodnotit několik jevů, které jsou pro většinu cementů společné. Počáteční nabývání bylo u všech cementů až na cement Mokrá značně proměnlivé. Tento fakt lze přisoudit jednak drobným odchylkám v chemickém složení a jemnosti mletí [7], ale také v rychlosti a průběhu hydratace. Obecně lze říci, že rozdílné chování může být způsobeno nevhodným nebo nedostatečným zabalením vzorků a při dopravě. Drobné rozdíly může způsobit také lidský faktor během míchání a plnění žlabů. Vyhodnocení nabývání bylo uvedeno v předchozím odstavci. U smrštění je vyhodnocení proměnlivých hodnot o to složitější, protože se k chemickému smrštění přidává také smrštění vysycháním, které je velmi závislé na daném prostředí. Vzhledem k tomu, že měření probíhalo dlouhodobě od zimy do léta lze přisoudit určitý vliv i tomuto faktoru. Důležitý jev, který může ovlivnit dobu smršťování je pevnost, čím je vyšší, tím výraznější schopnost má malta zachytávat tyto objemové změny. Tyto aspekty pak mohou způsobit, že některé vzorky se měřitelně smršťují 80 dní a jiné pouze 40.

Velmi výhodným vyhodnocením je také zpracování grafu zobrazujícího pouze smrštění, viz obrázek 11. Ten ukazuje, jaké je konečné smrštění neovlivněné počátečním nabýváním, které může být dosti zkrslující. Graf smrštění má počátek v místě, kde je kladné maximum (nabývání) a malta se začíná smršťovat. Znamená to především navýšení hodnoty smrštění. Z níže uvedeného grafu je tak patrné, že je velmi obtížné rozhodnout, který cement se chová nejstabilněji nebo má nejnižší smrštění. Z hlediska nejnižší hodnoty smrštění na tom je pravděpodobně nejlépe cement Radotín, který ač má vysokou proměnlivost, tak pouze jediný vzorek překročil hodnotu smrštění 1 mm/m. Velmi obdobně lze hodnotit také cement Hranice, hodnotu smrštění 1 mm/m překročil jeden vzorek a ten výrazně vybočuje oproti ostatním. Stabilita je u všech cementů velmi proměnlivá, pokud by se u hranického cementu opět vyloučil výrazně vybočující vzorek, jednalo by se o nejstabilnější cement, nízký rozsah má také cement Prachovice, ten má ale výrazně vyšší smrštění.



Obr. 11: Přehled smrštění všech cementů

Na obrázku číslo 11 lze pozorovat určitý trend kopírující roční období. Čím teplejší měsíc, tím nižší smrštění. Klimatické podmínky obvykle hrají významnou roli v objemových změnách, ale je nutné si uvědomit, že v akreditované laboratoři musí být celý rok stejné laboratorní podmínky a tak lze s jistotou říct, že během míchání a měření neměl tento faktor vliv na výsledky. Možný vliv lze tomuto faktoru přisoudit při výrobě cementu. Nicméně lze konstatovat, že složení je celoročně stabilní (kromě standardních odchylek) a vypořádat výkyvy v závislosti na ročním období není možné. Potenciální vliv lze přisoudit také dopravě, ale vzorky byly v drtivé většině hermeticky uzavřené a doprava proběhla v co nejkratším možném termínu.

6 ZÁVĚR

Z hlediska praktických výsledků lze pozorovat proměnlivost nejen mezi jednotlivými cementy, ale také mezi vzorky stejného cementu. Určité rozdíly mezi jednotlivými cementy jsou pochopitelné a je nutné říct, že rozdíly nejsou nijak markantní, zejména u smrštění bylo velmi obtížné hodnotit stabilitu vlastností cementu v čase, stejně tak nejnižší smrštění. Proměnlivost vzorků stejného cementu je komplexní problém a je zcela určitě způsoben, kromě souhry drobných odchylek chemického složení a jemnosti mletí, také vnějšími vlivy, mezi které patří vliv uložení vzorku, drobné odlišnosti během měření a proměnlivé prostředí.

V souvislosti s prostředím je nutné zmínit také dobu uložení zkušebních těles v ideálních podmínkách, v této práci bylo zvoleno 7 dní a bylo by tak velice zajímavé porovnání s dobou uložení ve vlhkém/vodním prostředí po 3 dnech, nebo naopak například po 28 dnech. Smrštění by tak bylo zachyceno v různých intenzitách a kompozit by měl různě vysoké pevnosti. V souvislosti s betony lze s jistotou tvrdit, že hodnoty objemových změn stejných cementů by se s ohledem na kamenivo, množství cementu, vodní součinitel a další faktory výrazným způsobem snížily.

LITERATURA

- [1] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Binders for durable and sustainable concrete*. New York: Taylor & Francis, 2008, xxviii, 500 p. ISBN 9780203940488-.
- [2] AÏTCIN, Pierre-Claude a Sidney MINDESS. *Sustainability of concrete*. New York: Spon Press, 2011, xxv, 301 p. Modern concrete technology, 17. ISBN 0203856635.

- [3] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [4] ČSN 73 1320 + Z1. *Stanovení objemových změn betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [5] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [6] HOLT, Erika E. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2001. ISBN 9513858707.
- [7] KROPÁČEK, Michal. *Stanovení objemových změn cementů z různých lokalit v závislosti na čase*. Ostrava, 2014. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta stavební.
- [8] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Tomáš VYMAZAL, Petr DANĚK, Petr MISÁK a Ondřej POSPÍCHAL. Standardní operační postup pro stanovení smršťování a nabývání betonu. [online]. 2009, č. 1, s. 8 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: http://www.szk.fce.vutbr.cz/metodiky/metodika%20smr%C5%A1t%C4%Bn%C3%AD_01-09_1.pdf.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Kolísko Jiří, Ph.D., Oddělení experimentálních a měřicích metod, Kloknerův ústav, ČVUT v Praze.

Ing. Karel Dvořák, Ph.D., Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební, VUT v Brně.